

УДК 552.08; 553.983

Д.А. Марунова¹, Н.В. Пронина², А.Г. Калмыков³,
Д.А. Иванова⁴, Г.А. Калмыков⁵

СТАДИИ ПРЕОБРАЗОВАННОСТИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОРОД ТУТЛЕЙМСКОЙ СВИТЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕГО МАЦЕРАЛЬНОГО СОСТАВА

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1

Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

Представлены результаты углпетрографических и геохимических исследований органического вещества пород тутлеймской свиты на площади Ем-Еговской вершины. Выявлено пять мацералов, составляющих органическое вещество изучаемой свиты: «обычный» битуминит, «атипичный» битуминит, органическое вещество радиолярий, альгинит и витринит, а также битум и битумные пленки продукты преобразования исходного органического вещества. Описано изменение мацералов в процессе катагенеза, а также установлен порядок их вступления в фазу генерации. Показано, что первым начинает преобразовываться альгинит, затем «обычный» битуминит, «атипичный» битуминит и последним — органическое вещество радиолярий. Полученные результаты подтверждены результатами лабораторного моделирования дальнейшего преобразования органического вещества.

Установлено, что формируются новые битумы, которые обладают флуоресцентными свойствами и отличаются от исходных. Полученные результаты в сочетании с изучением изменений состава как мацералов, так и битумов позволяют оценить вклад отдельных микрокомпонентов органического вещества в процесс генерации нефтяных углеводородов.

Ключевые слова: тутлеймская свита, углпетрография, органическое вещество, мацеральный состав, битуминит, катагенетическое преобразование, лабораторное моделирование преобразования керогена.

The paper presents the results of coal petrographic and geochemical studies of the Tutleim Formation rocks organic matter in the area of the Em-Egovskaya summit. Five macerals were identified that compose the organic matter of the studied formation: “standard” bituminite, “atypical” bituminite, radiolarian organic matter, alginite and vitrinite, as well as bitumen and bitumen films, which are the products of the original organic matter transformation. The metamorphosis in macerals during catagenesis is described, and the order of their entry into the generation phase is established. It has been shown that alginite starts transforming first, then “standard” bituminite, “atypical” bituminite, and the last one is the radiolarian organic matter. The results obtained were confirmed by the laboratory modeling of the further organic matter transformation. New bitumens are formed with different fluorescent properties compared to the initial ones. The results obtained in combination with the study of changes in the composition of both macerals and bitumen can make it possible to assess the contribution of individual organic matter microcomponents to the process of petroleum hydrocarbons generation.

Keywords: Tutleim formation, coal petrography, organic matter, maceral composition, bituminite, catagenetic transformation, laboratory modeling of kerogen transformation.

Введение. К критериям поиска месторождений нефти и газа относится выявление нефтематеринских толщ, которые к настоящему моменту уже сгенерировали достаточное количество углеводородов (УВ) для заполнения существующих ловушек. Процессы, происходящие в нефтематеринских

отложениях, изучали многие отечественные и зарубежные исследователи на протяжении более 50 лет [Конторович и др., 1975; Вассоевич, 1979; Брадучан и др., 1986; Филина, 1984; Гулари и др., 2005; Кирюхина и др., 2013; Баженова, 2021; Stock et al., 2017; Wu et al., 2018; Hackley et al., 2016]. Оценка

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, бакалавр; *e-mail:* d_magunova@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, ст. науч. с., канд. геол.-минер. н.; *e-mail:* nvprncl@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, ст. науч. с., канд. хим. н.; *e-mail:* a.g.kalmykov@gmail.com

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, инженер; *e-mail:* dane4ka.ivanova@yandex.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, профессор, докт. геол.-минер. н.; *e-mail:* gera64@mail.ru

характеристик нефтематеринских пород позволяет определить, сколько нефти было сгенерировано, какая доля сгенерированных УВ все еще аккумулирована в пласте, а какая часть УВ мигрировала в вышележащие коллекторы [Санникова и др., 2019]. При этом для оценки перспектив необходимо не только определить современные параметры нефтематеринской толщи, но и охарактеризовать процессы генерации УВ, влияющие на количество и состав различных УВ ресурсов.

Одна из ключевых и самая крупная нефтематеринская формация России — баженовская свита (БС), расположенная на территории Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна. Свита (и ее аналоги) имеет неоднородное строение, что подтверждается многочисленными исследованиями [Постников и др., 2017; Калмыков, 2017; Калмыков и др., 2019; Топчий и др., 2019], в том числе характеризуется неоднородным распределением органического вещества (ОВ) и его составом в отложениях. Несмотря на то что к настоящему времени выполнен огромный объем работ по изучению ОВ баженовской свиты [Гончаров и др., 2004; Козлова и др., 2019; Пронина, 2021], подробных исследований мацерального состава ОВ, его изменчивости по разрезу и территории, генезиса, процессов преобразования отдельных микрокомпонентов в литературе практически нет. Вопросы характеристик ОВ на микроуровне не получили однозначного ответа и их продолжают обсуждать в публикациях и на научных конференциях.

Свита разнородна, поэтому характеристики образцов, расположенных на небольшом расстоянии, могут сильно различаться, из-за этого неправильно использовать экстраполяцию отдельных результатов для бассейнового моделирования строения свиты. Так как в момент накопления баженовской свиты в морском бассейне обитали различные организмы: двусторки, аммониты, брахиоподы, губки, фораминиферы, зеленые, золотистые и пирогитовые водоросли, радиолярии [Эдер и др., 2015], состав ОВ свиты также разный, и каждый микрокомпонент состава вносит разный вклад в характеристики пород и процессы генерации УВ при катагенетическом преобразовании. Это связано с разным генезисом отдельных компонентов. В углепетрографии для генетической классификации ОВ используются термины «мацерал» и «битум».

Мацералы — органические микрокомпоненты, отличающиеся под микроскопом по характерным петрографическим признакам: оптическим свойствам (цвет, отражательная способность, анизотропия, преломление, их показатели), рельефу, морфологии, размеру. Элементный состав мацералов варьирует в определенных пределах, определяется составом исходного ОВ, условиями его захоронения (первичные факторы) и преобразованиями, произошедшими при погружении и попадании в зоны с высокими температурой и давлением (вторичные факторы). На основе первичных факторов выделяют три группы мацералов: витринит — лигнино-целлюлозные ткани

растений, захороненные в анаэробных условиях; инертинит, имеющий подобное витриниту исходное ОВ, однако, предположительно, обстановка захоронения ОВ аэробная; липтинит — покровные ткани и смоляные вещества, захороненные в разнообразных обстановках [Штах и др., 1978]. Важно отметить, что классификация мацералов построена на их растительном (высшие и низшие) происхождении, тогда как ОВ животных организмов в классификации часто не принимают во внимание. Таким образом, при определении мацералов предполагается учитывать их генезис, однако в настоящее время однозначной классификации всех мацералов, включающей их генетическое происхождение, нет.

Битум — жидкие углеводородные соединения, выделяющиеся из мацералов в процессе их преобразования, которые присутствуют в породе в виде пленок, налетов или сгустков. Термин часто применяют в таком значении как в русской [Топчий и др., 2019; Калмыков и др., 2019; Пронина, 2021], так и в зарубежной литературе [Curiale, 2016; Mastalerz et al., 2018; Pickel et al., 2017]. Углепетрографические признаки, которые могли бы позволить разделить битум на сорбированные и свободные углеводородные соединения, на настоящий момент не выявлены, поэтому все жидкие продукты нефтяного ряда называют битумом. Также невозможно точно определить на углепетрографическом уровне какие битумы образуются из каких мацералов.

Отметим, что в органической геохимии термин «битум», а точнее «природный битум», применяется для описания нафтоидов, генетически не связанных с нефтью, и для продуктов природного преобразования нефти [Баженова, 2000]. Включение в группу природных битумов продуктов, генетически связанных с нефтью (продуктов природного преобразования нефти-нафтоидов), а также не связанных с ней (нафтоидов) вызывает некую путаницу при описании генезиса ОВ. В углепетрографических исследованиях термин «битум» не включает в себя эти геохимические составляющие природных битумов.

Таким образом, состав ОВ высокоуглеродистой баженовской свиты и ее аналогов может различаться, что определяется генезисом отдельных микрокомпонентов. Особенности конкретных мацералов позволят оценить их роль в процессах генерации, миграции и аккумуляции нефтяных углеводородов, а выделение прослоев с определенным составом органического вещества даст возможность строить более точные геологические и бассейновые модели для отдельных территорий. Целью нашей работы было изучение ОВ тутлеймской свиты (ТС) на территории Ем-Еговской вершины (рис. 1) и выявление особенностей преобразования отдельных мацералов в катагенезе.

Материалы и методы исследований. Исследуемые образцы. Объектом исследования стало ОВ из разреза пород ТС из 5 скважин на территории Ем-Еговской вершины. Для определения характеристик

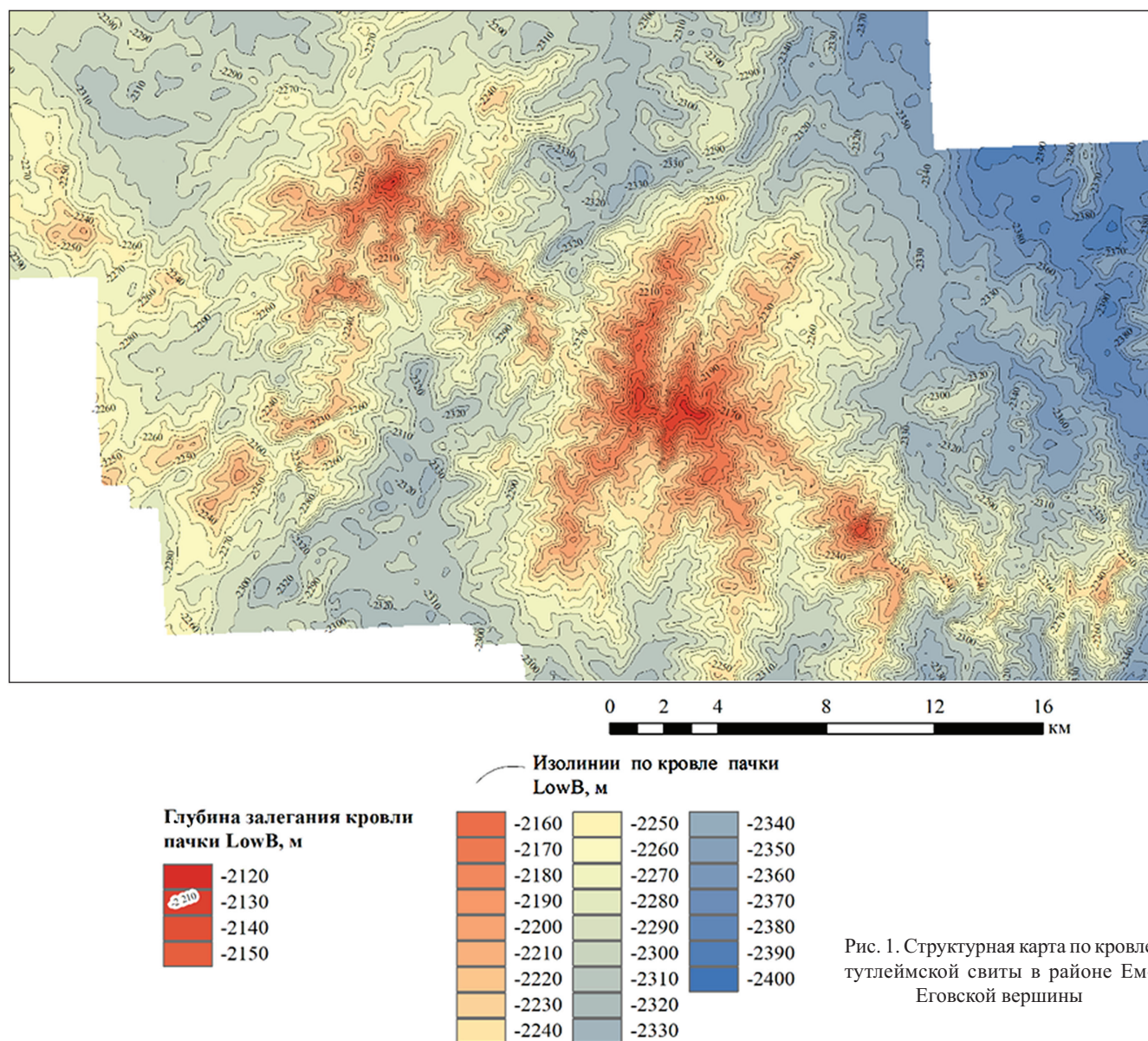


Рис. 1. Структурная карта по кровле тутлейевской свиты в районе Ем-Еговской вершины

ОВ исследовано около 300 образцов, полностью характеризующих разрез свиты. Для изучения мацерального состава по результатам пиролиза выбрано 14 образцов пород ТС. Лабораторное моделирование преобразования мацералов выполнено на 7 образцах, для которых проведены углепетрографические исследования.

Методики исследования. Для определения характеристик ОВ на первом этапе образцы пород ТС истирали до порошкообразного состояния и экстрагировали хлороформом (ХЧ) в аппарате Сокслета. Экстракция заканчивалась при достижении в растворе в охлажденном аппарате значений концентрации раствора $\leq 0,000625\%$ битумоида (3 балла).

Содержание ОВ, его тип, зрелость и нефтегенерационный потенциал на образцах определяли методом пиролиза на приборе Rock-Eval-6. Пиролиз выполняли по стандартной методике, подробно описанной, например, в работах [Espitalie et al., 1993; Лопатина и др., 1987].

Для углепетрографических исследований были изготовлены аншлифы. Для этого сначала шлифовали выбранную поверхность на шлифовальном станке с постепенным уменьшением зернистости шлифпорошка, затем полировали на вращающемся диске с применением алмазной пасты либо пасты ГОИ.

Углепетрографические исследования проводили на установке QD1302 (Craic Technologies) согласно ГОСТам: 9414.2-93 (Уголь каменный и антрацит. Методы петрографического анализа. Ч.2: метод подготовки образцов); 9414.3-93 (Методы петрографического анализа углей. Ч. 5: метод определения показателя отражения витринита с помощью микроскопа); 12113-94 (Угли бурые, каменные, антрациты, твердые рассеянные органические вещества). Метод определения показателей отражения соответствует международному стандарту ISO 7404-5. Исследования заключались в описании аншлифов, замерах показателя отражения согласно ГОСТам 12113-94 и ISO 7404-5 в масле с объективом х50 и эталоном

Yttrium-Aluminium (RV 0,905%), а также в изучении образцов в ультрафиолетовом свете.

Для изучения дальнейшего преобразования мацералов выполнен эксперимент по лабораторному моделированию преобразования ОВ. Эксперимент проводился на 7 образцах цилиндрической формы (размер 30×30 мм), которые помещали в автоклавы, добавляли дистиллированную воду в объеме, позволяющем при условиях эксперимента достигать пластового давления (30 МПа), после чего образцы прогревали при температуре 350 °С в течение 12 ч. После прогрева автоклавы охлаждали до комнатной температуры, извлекали образцы, высушивали и передавали на изготовление аншлифов и изучение мацерального состава. Часть образца истирали в порошок, на котором проводили пиролитические исследования.

Результаты исследований и их обсуждение.

Исследования позволили детально изучить ОВ тутлеймской свиты. Поскольку существуют некоторые различия в геохимических и углепетрографических терминах, важно отметить, что термины «кероген» и «битумоид» используются в органической геохимии для описания нерастворимого в органических растворителях ОВ и растворимого соответственно. В углепетрографии для описания этих аналитических понятий применяются термины «мацералы» и «битум». В статье использованы углепетрографические термины.

Органическое вещество тутлеймской свиты.

Результаты пиролитических исследований показали, что ОВ пород ТС в районе Ем-Еговской вершины находится в середине главной зоны нефтеобразования. Водородный индекс исследуемых образцов варьирует в диапазоне 300–600 мг УВ/г ТОС, при этом среднее значение в отдельных скважинах составляет 350–400 мг УВ/г ТОС. Параметр $T_{\max}$ для всех образцов варьирует в интервале 430–440 °С. Можно считать, что градация катагенеза для изучаемого ОВ — МК2.

Как сказано ранее, ОВ ТС можно разделить на мацералы (ОВ, нерастворимое в органических растворителях) и битум (растворимое ОВ). В разрезах ТС на изучаемой территории встречаются мацералы групп *витринита* и *липтинита*, представляющие собой исходное ОВ (согласно классификации ИССР-94), а также *битумы* — продукты его преобразования. Рассмотрим подробнее, чем представлены указанные мацералы.

Группа витринита (Vt) (рис. 2). В группу витринита согласно международной классификации входят телинит, коллотелинит, витродетринит, коллодетринит, корпогелинит и гелинит (ИССР-94). Встречающиеся в разрезах ТС зерна мацералов имеют окатанную форму, светло-серый цвет в отраженном свете, не обладают флюоресценцией. Из-за малого размера зерен распознавание отдельных мацералов этой группы затруднено. В результате было принято решение использовать термин «витринит»

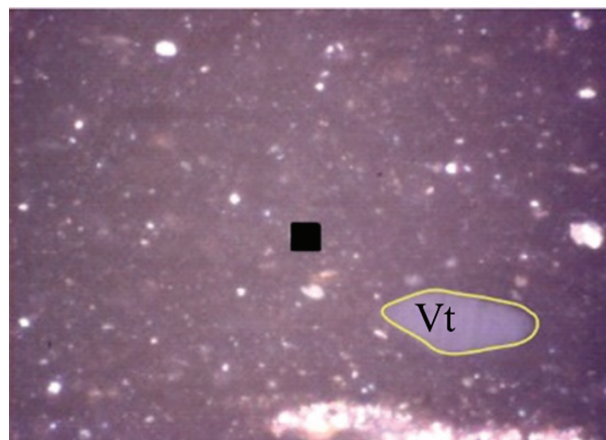


Рис. 2. Фото витринита (Vt). Простой отраженный свет

для всех витринитовых мацералов. Мацерал редко встречается в отложениях свиты, в связи с чем числа замеров показателя отражения по нему недостаточно для получения точной характеристики зрелости ОВ.

Группа липтинита. К мацералам группы липтинита относятся споринит, кутинит, резинит, суберинит, альгинит, эксудатинит, хлорофиллинит, липтодетринит и битуминит. Исследования отложений ТС на всей территории их распространения показали, что основные и самые распространенные мацералы — битуминит и альгинит. Другие мацералы либо встречаются очень редко, либо не встречаются вообще.

Битуминит — самый распространенный мацерал пород ТС на исследуемой территории, выделен в группу липтинита в 1994 г. Международным комитетом по угольной и органической петрологии и детально описан в современных статьях [Pickel et al., 2017]. В отраженном свете он имеет серый цвет, практически не люминесцирует. Битуминит, первоначально образующийся из водорослей и других организмов, встречается в виде комочков, линз и слоев разных размера и формы. Поскольку в исследованных разрезах битуминит — преобладающий мацерал, он будет определять процессы генерации УВ при оценке нефтематеринских свойств на рассматриваемой площади.

В группе битуминита можно выделить несколько разновидностей мацерала: «обычный» битуминит, «атипичный» битуминит и остатки органического вещества радиолярий. Эти мацералы имеют разную форму выделения, на основе чего можно сделать предположение об их различном происхождении.

«Обычный» битуминит (рис. 3, а, б) (bit) предположительно образуется из водорослей. Поскольку исходная водорослевая структура теряется очень рано, «обычный» битуминит чаще всего характеризуется как аморфное ОВ серого цвета [Пронина, 2021]. Как правило, на «обычный» битуминит в разрезах ТС исследуемой территории приходится основная доля ОВ (70–100%).

В настоящее время по замерам показателя отражения «обычного» битуминита можно рассчитать

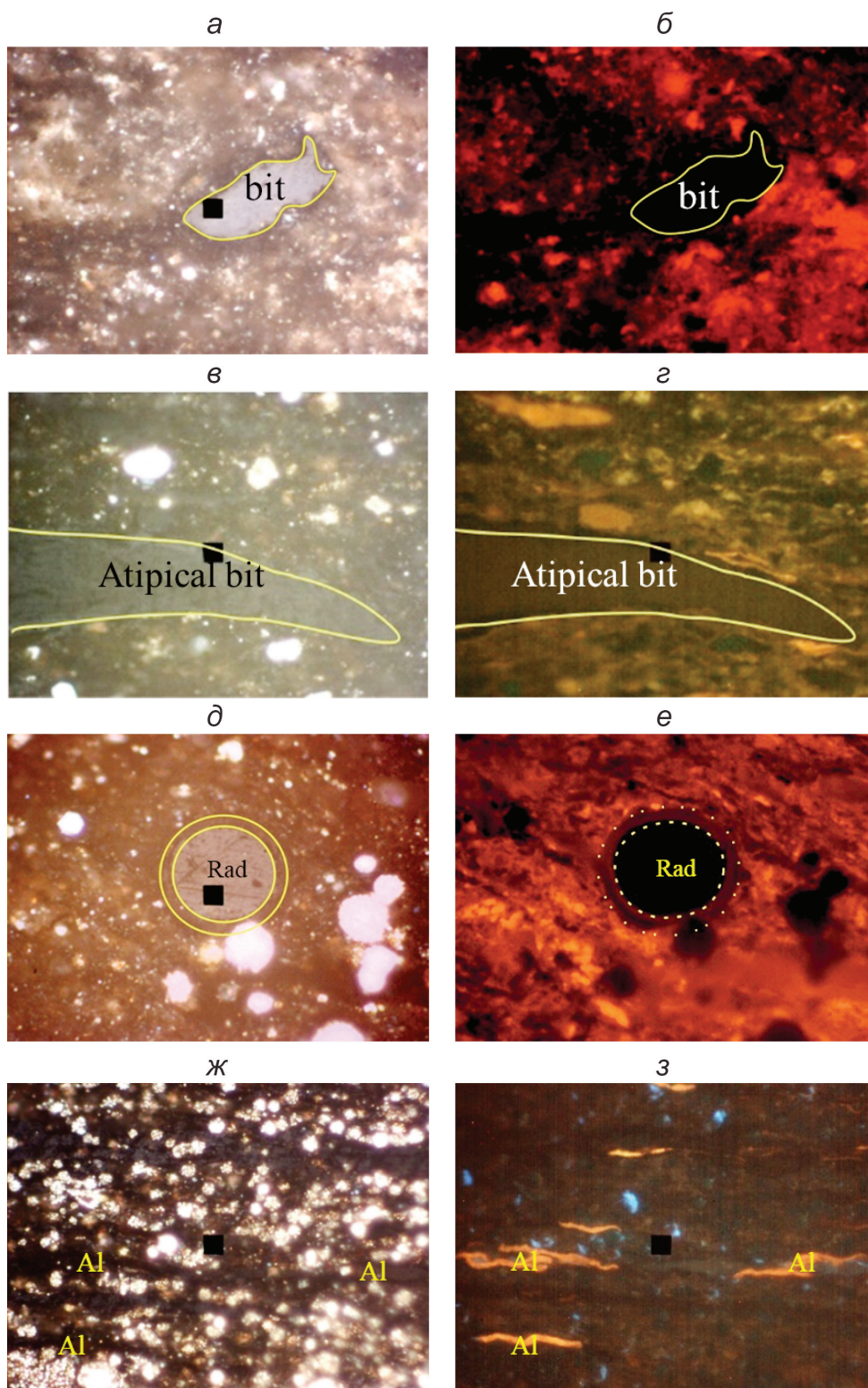


Рис. 3. Фото «Обычного» битуминита (bit, а, б); «атипичного» битуминита (Atypical bit, в, г); радиоларии (Rad, д, е); альгинита (Al, ж, з); (а, в, д, ж — простой отраженный свет; б, г, е, з — ультрафиолетовый свет)

эквивалентное значение отражательной способности витринита, для чего используется формула пересчета [Liu, 1994]. Однако на исследуемой территории размеры частиц слишком малы, что часто может приводить к погрешностям измерения, поэтому результаты таких замеров в работе не приводятся.

«Атипичный» битуминит (рис. 3, в, г) (Atypical bit), несмотря на схожесть с «обычным» битуминитом по углепетрографическим признакам, отличается

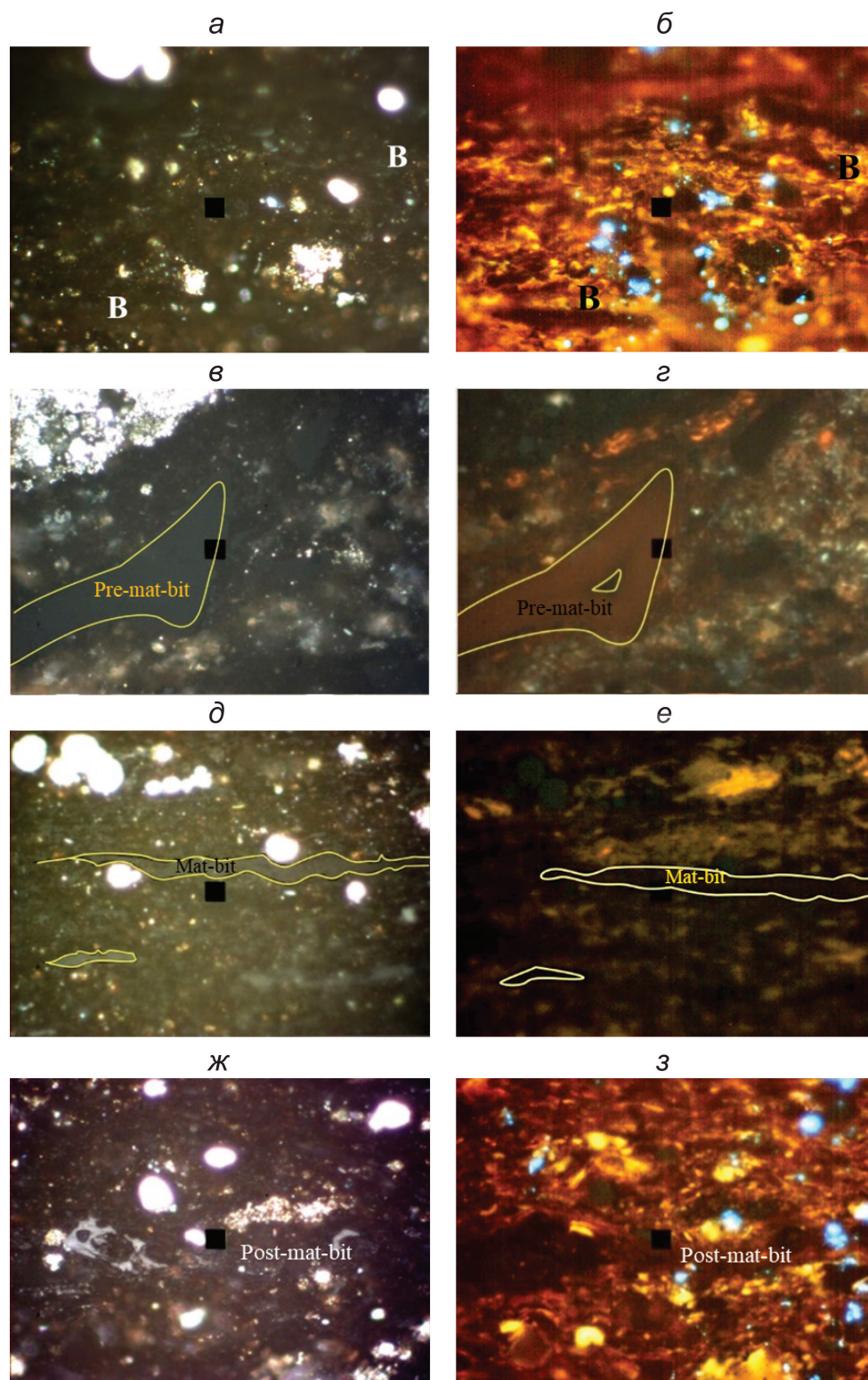
ся большими размерами, имеет вытянутую форму зерен и несколько отличающуюся закономерность изменения отражательной способности в процессе его преобразования. Вероятно, это связано с некоторыми различиями в природе исходного ОВ мацералов. Предположительно, «атипичный» битуминит — остатки планктонных водорослевых микроорганизмов. Изменения мацерала в процессе его преобразования и генерации углеводородных соединений и цвет исходного ОВ позволяют отнести его к группе битуминита.

По «атипичному» битуминиту можно заме-

рять показатель отражения, однако он будет только качественно характеризовать зрелость ОВ, так как в настоящее время нет формулы пересчета получаемых значений на показатель отражения витринита.

Остатки органического вещества радиоларий (рис. 3, д, е) (Rad) представлены круглыми образованиями серого ОВ внутри остатков минерального скелета организмов. Обычно по ОВ радиоларий не измеряют показатель отражения, так как формула

Рис. 4. Фото битума (В, а, б); «обычного» битуминита на разных стадиях генерации: в, з — догенерационный «обычный» (Pre-mat-bit) битуминит; д, е — генерационный «обычный» (Mat-bit) битуминит; ж, з — постгенерационный «обычный» (Post-mat-bit) битуминит (а, в, д, ж — простой отраженный свет; б, з, е, з — ультрафиолетовый свет)



пересчета значений отсутствует, а количества встреченных частиц часто недостаточно для сбора статистически достаточного количества замеров.

Альгинит (А1, ОВ I типа) характеризуется повышенным содержанием водорода, имеет характерную водорослевую структуру, яркую люминесценцию в ультрафиолетовом (УФ) свете. Альгинит отсутствует в скважинах, в которых степень зрелости ОВ выше МК2. Такая его особенность позволяет предположить, что при достижении определенного температурного уровня альгинитовое вещество вырабатывает свой потенциал и теряет диагностические признаки. Кероген альгинитовых слоев имеет узкий диапазон генерации УВ, в отличие от керогена II типа, слагающего основную массу ОВ тутлеймской свиты [Булатов и др., 2021]. Альгинит может встречаться в виде прослоев или в виде единичных включений (рис. 3, ж, з).

Битумы и битумные пленки (В) (рис. 4, а, б) встречены в образцах повсеместно, в простом свете окрашивают породу в коричневый цвет, имеют

нечеткие контуры, в УФ свете они, как правило, характеризуются свечением разной интенсивности и цвета. Битумы присутствуют во многих образцах и имеют разнообразную форму [Пронина, 2021; Калмыков и др., 2019]. Пленки или примазки битумов составляют иногда все ОВ породы. Битумы могут находиться в виде оторочек вокруг битуминита или внутри вторичных пор как минеральной матрицы, так и отдельных мацералов.

Преобразованность мацералов тутлеймской свиты в районе Ем-Еговской вершины. Исследования показали, что даже в пределах одного аншлифа встречаются мацералы с разной степенью преобразованности. Установлено, что каждый мацерал в процессе созревания преобразуется по-разному и вступает в фазу генерации на разных грациях катагенеза соответственно, вносит разный вклад в процесс генерации нефтяных углеводородов. В исследуемых разрезах ТС ОБ находится в середине главной зоны нефтеобразования (грация катагенеза МК2), что позволяет оценить вовлеченность отдельных мацералов в процесс генерации нефти.

Приведем результаты определения отдельных мацералов в исследуемом разрезе и оценку их вовлеченности в процесс генерации нефтяных углеводородных соединений.

«Обычный» битуминит (рис. 4, в, г, д, е, ж, з) в исследуемых разрезах ТС встречается трех стадий зрелости: догенерационный (Pre-mature bit), генерационный (Mature-bit) и постгенерационный (Post-mature bit), который в литературе также называется твердый битум (solid bitum), SB — обуглероженная часть ОБ после генерации жидких УВ [Hackley et al., 2018]. Обычно SB очень малы [Калмыков и др., 2019], поэтому их невозможно наглядно выделить на фотографиях. Чаще всего в исследуемых образцах встречается постгенерационный «обычный» битуминит.

На рис. 4, в, г показан догенерационный битуминит. Контур зерна четкий, однако внутри зерна встречена вторичная пора, которая указывает на начало преобразования ОБ. В дальнейшем пора может заполниться ярко флюоресцирующим битумом, генерируемым мацералом. В ультрафиолетовом свете видно, что внутри и по контуру зерна битум еще отсутствует. На рис. 4, д, е представлен мацерал генерационный. Контур зерна имеет неровный, кружевной характер, само зерно уменьшается и утончается, внутри прослеживаются трещины. В УФ свете видны «битумные пленки» по контуру зерна и в окружающем мактриксе. На рис. 4, ж, з видны только остатки зерна (в виде мелких белых вкраплений) и ярко люминесцирующие битумные пленки, т.е. основную часть углеводородных соединений мацерал уже сгенерировал. Белый цвет остатков в отраженном свете объясняется их сильной обуглероженностью. Углеводородные части структуры керогена отделились от исходного мацерала в процессе генерации битума. Замерить показатель отражения мацерала на приведенных фото не удалось из-за маленького размера зерен битуминита, однако диагностировать степень преобразованности мацерала можно по описанным внешним признакам.

На фото наблюдается изменение флюоресценции мацерала с изменением степени зрелости от темно-коричневых оттенков у слабозрелого битуминита до отсутствия флуоресцентных свойств у более зрелого битуминита и твердого битума. Такая

же закономерность установлена для «атипичного» битуминита. Отметим, что флюоресцирует не сам мацерал, а выделившиеся из него и сорбированные на его поверхности углеводородные соединения. Изменение битуминита в процессе его преобразования и различия в флюоресценции соответствуют изменениям, установленным зарубежными исследователями, например, в породах формации Сланец Нью-Олбани (New Albany Shale) [Mastalerz et al., 2018].

«Атипичный» битуминит на грации катагенеза МК2 встречается догенерационный и генерационный. Созревание «атипичного» битуминита начинается от краев зерна к центру, что можно заметить по зональной флюоресценции выделившихся УВ соединений, теряющей интенсивность к центру зерна (рис. 5, а, б). Показатель отражения «атипичного» битуминита, приведенного на фото, равен 0,2%. Контур зерна четкий, вторичная пористость отсутствует, по краю зерна наблюдается флюоресцирующий выделившийся битум. С увеличением зрелости у мацерала появляется вторичная пористость (как у «обычного» битуминита), битумы могут находиться внутри вторичных пор (рис. 5, в, г), контур зерна теряет четкие очертания. Показатель отражения «атипичного» битуминита на рис. 5 в, г составляет 0,24%.

Остатки мягкого тела радиолярий на стадии МК2 представлены серым исходным (догенерационным) веществом, флюоресценция отсутствует (рис. 5, д, е). Следовательно, можно предполагать, что генерация углеводородных соединений еще не началась.

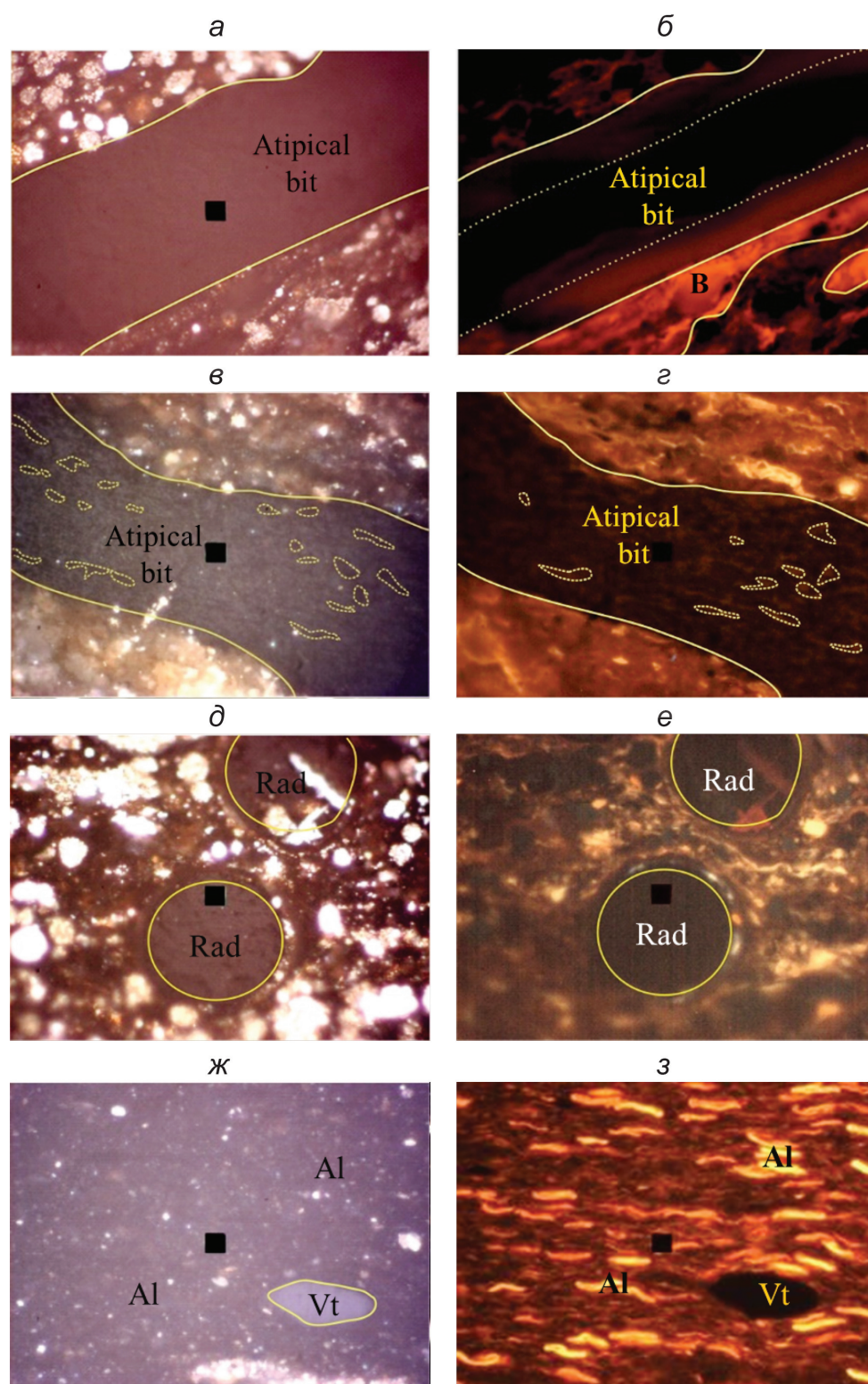
Встреченный в породах альгинит — генерационный. Выделившиеся битумы ярко люминесцируют в оттенках желто-оранжевого цвета (рис. 5, ж, з), в отраженном свете имеют коричневый цвет (за счет битума). В отдельных случаях в породах могут встречаться редкие частицы витринита. Подобный алигинит, называемый ламальгинитом и талальгинитом, обнаружен американскими исследователями [Kus et al., 2017] в образцах нефтематеринских свит из Германии, Китая и Перу.

На основе полученных результатов можно сделать вывод о порядке вступления мацералов в фазу генерации: раньше всех вступает альгинит, затем «обычный» битуминит, затем «атипичный» битуминит, и последним ОБ мягкого тела радиолярий.

Преобразованность мацералов тутлеймской свиты после эксперимента по лабораторному моделированию созревания органического вещества. Так как степень зрелости изучаемых образцов соответствует грации катагенеза МК2, для того, чтобы проанализировать дальнейшее преобразование мацералов проведены эксперименты по лабораторному моделированию катагенетического созревания пород.

Результаты исследования образцов после гидротермального воздействия показали, что водородный индекс понизился с 300–600 до 100–320 мг УВ/г ТОС, параметр $T_{\max}$ увеличился с 430–440 до

Рис. 5. Фото «атипичного» битуминита на разных стадиях генерации: *а, б* — догенерационный «атипичный» битуминит; *в, г* — генерационный «атипичный» битуминит; радиоларии (*д, е*); зерна витринита в альгинитовом прослое (*ж, з*); *а, в, д, ж* — простой отраженный свет; *б, г, е, з* — ультрафиолетовый свет



440–450 °С (рис. 6). Можно считать, что градация катагенеза для образцов после эксперимента увеличилась до МКЗ, т.е. ОВ приближается к концу главной зоны нефтеобразования.

У всех прогретых образцов наблюдаются схожие изменения ОВ. На рис. 7, *а, б* показан исходный образец, в нем выделяются прослой постгенерационного битуминита и зерно генерационного «обычного» битуминита, выделившийся битум люминесцирует в оттенках оранжевого цвета. На рис. 7, *в, г* (после

прогрева) видно, как вокруг зерна образовалась битумная пленка, интенсивно флюоресцирующая красно-оранжевым цветом, в таких же тонах цвета люминесцирует канал, по которому углеводородные соединения мигрируют по породе, на рис. 7, *а, б* следы миграции отсутствуют. На рис. 7, *д, е* выделяется прослой постгенерационного битуминита. После прогрева выделившийся из мацерала битумы светятся в УФ свете ярко-голубым и синим. В образцах до прогрева битум люминесцировал в оттенках

Рис. 6. Модифицированная диаграмма Ван-Кревелена для изучаемых образцов до и после теплового воздействия

желто-оранжевого цвета (рис. 8, а, б). Необходимо отметить, что голубая флюоресценция битума появляется как у прослоев из органического вещества, так и при распределении битумов по всей породе (рис. 8, в, г).

В результате эксперимента удалось проследить изменения, происходящие с «атипичным» битуминитом. До прогрева на градиции катагенеза МК2 мацерал был в основном догенерационным и представлял собой зерна с ровным контуром и мелкими вторичными порами внутри зерна (рис. 8, д, е). После прогрева контур зерна мацерала потерял свои изначальные четкие очертания, от исходного ОВ остались лишь незначительные фрагменты, окруженные ярко флюоресцирующим в ультрафиолетовом свете битумом (рис. 8, ж, з). Можно предполагать, что в результате прогрева мацерал приобрел постгенерационный вид. Цвет люминесценции углеводородных

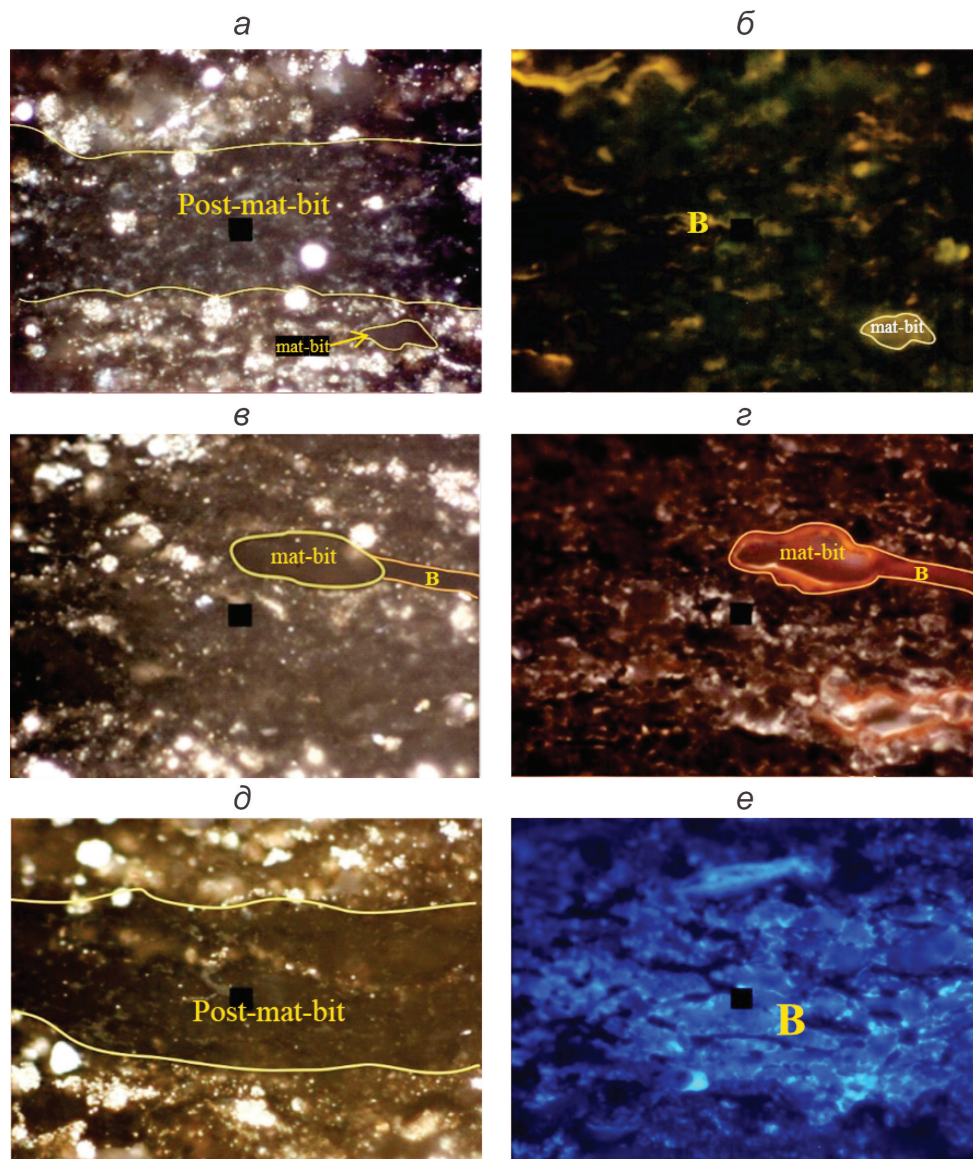
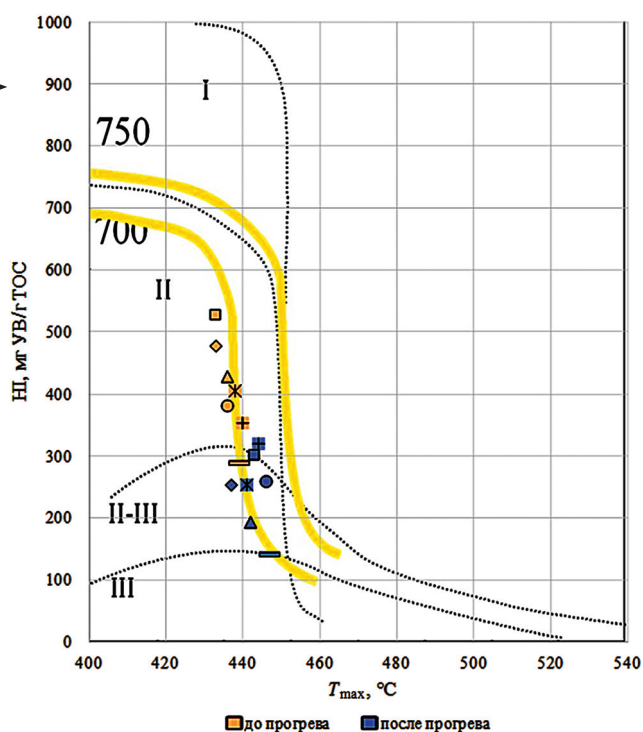
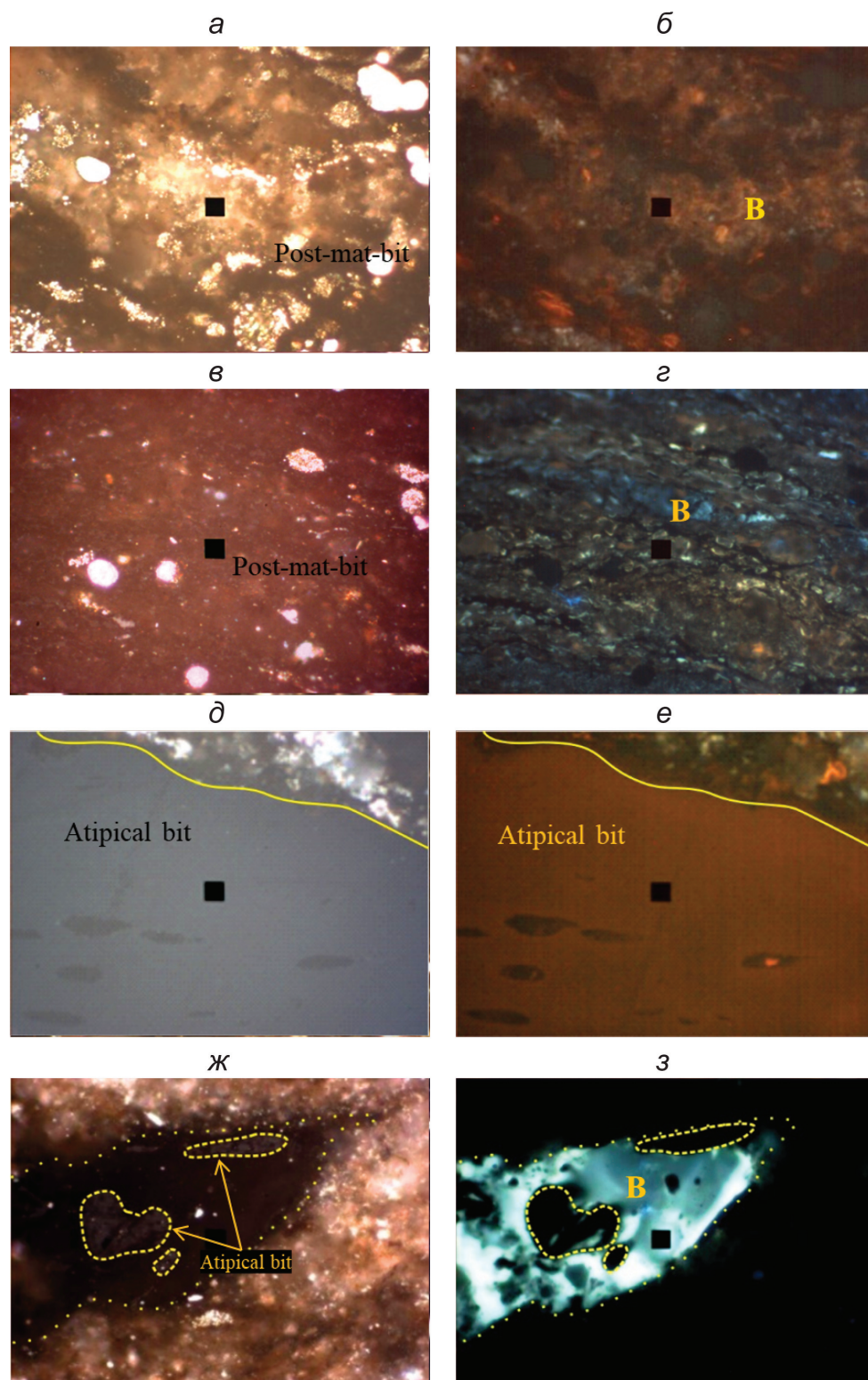


Рис. 7. Фото изменения «обычного» битуминита после температурного прогрева: а, б — до прогрева, прослой постгенерационного «обычного» битуминита и зерно генерационного битуминита; в, г — после прогрева, зерно генерационного «обычного» битуминита; д, е — после прогрева, постгенерационный «обычный» битуминит (а, в, д — простой отраженный свет; б, г, е — ультрафиолетовый свет)

Рис. 8. Фото изменения «обычного» битуминита после температурного прогрева: *а, б* — до прогрева, постгенерационный «обычный» битуминит и битум; *в, г* — после прогрева, постгенерационный «обычный» битуминит и битум; изменения «атипичного» битуминита после температурного прогрева; *д, е* — до прогрева, генерационный «атипичный» битуминит; *ж, з* — после прогрева, постгенерационный «атипичный» битуминит, битум (*а, в, д, ж* — простой отраженный свет; *б, г, е, з* — ультрафиолетовый свет)



соединений, генерируемых «атипичным» битуминитом, голубой.

В отличие от частиц «обычного» и «атипичного» битуминита, остатки ОВ радиоларий после прогрева не изменились, представлены исходным веществом серого цвета. Это может быть связано с недостаточным количеством приложенной энергии. Другое объяснение — влияние скелета организмов, который может выступать в качестве ингибитора процесса созревания ОВ и замедлять генерацию

битума из мацерала. Эти предположения требуют проверки.

Остатки альгинита, встреченные в незначительном количестве, представляют собой битум, ярко флюоресцирующий в оттенках оранжевого цвета (рис. 9). Так как до прогрева (рис. 9, *а, б*) альгинит уже практически выработал свой генерационный потенциал, после прогрева изменения практически не произошли. Углеводородные соединения, выделившиеся из мацерала, сохранились в породе,

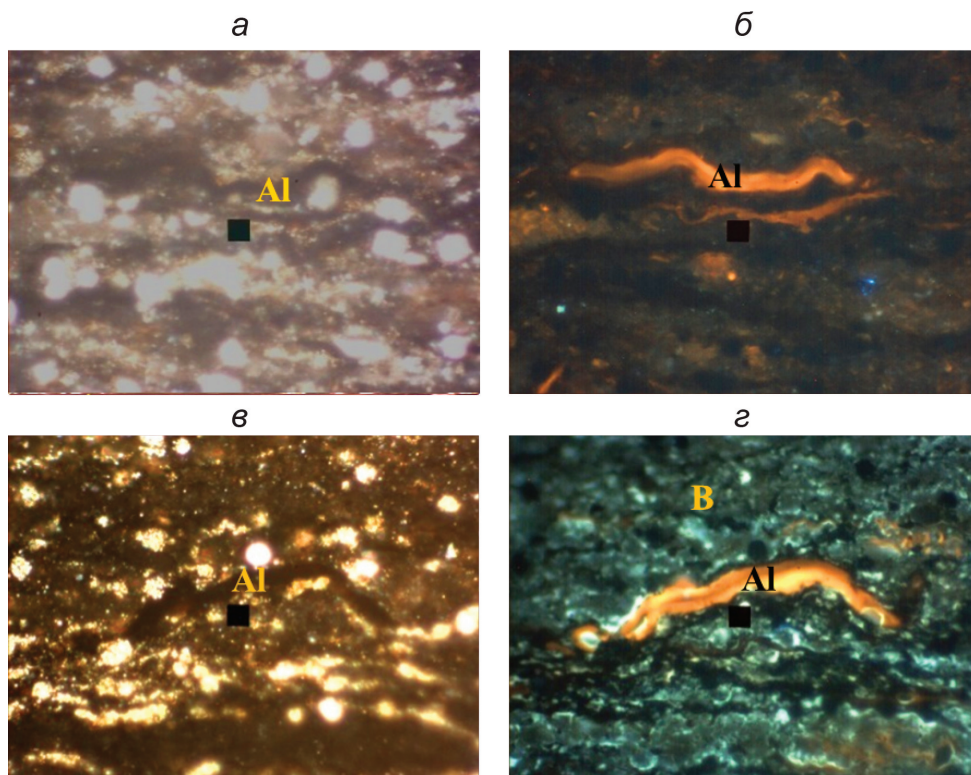


Рис. 9. Фото изменения альгинита после температурного прогрева: а, б — до прогрева, альгинит; в, г — после прогрева, альгинит и битум (а, в — простой отраженный свет; б, г — ультрафиолетовый свет)

и поскольку их цвет в ультрафиолетовом свете не изменился, можно предположить, что они не подверглись дальнейшему преобразованию. Битум, находящийся в породе, так же, как и в рассмотренных ранее образцах, флуоресцирует в оттенках голубого (рис. 9, в г).

Во всех изученных образцах отметим изменение флуоресценции битумов с оранжевого на голубой цвет. Подобные изменения могут говорить о более легком составе углеводородных соединений, генерируемых в процессе прогрева, по сравнению с битумами исходных образцов. Так как на пласт в природных условиях действует аномально высокое пластовое давление, при достаточной проницаемости пород может происходить миграция в зоны пониженного давления. Можно предположить, что легкие углеводородные соединения, люминесцирующие голубым, в исследуемых породах ТС формировались на ранних стадиях преобразования ОВ и могли мигрировать в вышележащие интервалы.

Эксперимент по прогреву позволил изучить изменение «атипичного» битуминита, который на стадии МК2 был слабо преобразован до постгенерационного вида. Мацерал генерирует основную часть углеводородных соединений только в конце главной зоны нефтеобразования. Так как зерна мацерала большие и могут присутствовать в породах ТС на исследуемой территории в значительном количестве (до 30%), оценка генерационного потенциала «атипичного» битуминита важна для оценки общего потенциала ОВ рассматриваемых отложений.

Заключение. Полученные результаты наглядно иллюстрируют мацеральный состав пород ТС,

а также показывают, как преобразуются мацералы в процессе созревания. Установлено, что ОВ свиты представлено преимущественно пятью мацералами: «обычным» битуминитом, «атипичным» битуминитом, остатками мягкого тела радиолярий, альгинитом и витринитом. Также выделены битумные пленки — продукты преобразования различных мацералов. Их наличие в образцах служит признаком начавшейся трансформации ОВ. Установлено, что на градации катагенеза МК2 встречается «обычный» битуминит трех стадий зрелости: догенерационный, генерационный и постгенерационный. Последний значительно преобладает. Встречен догенерационный и генерационный «атипичный» битуминит. Остатки органического вещества радиолярий представлены догенерационным исходным ОВ. Альгинит полностью генерационный.

Эксперимент по прогреву пород ТС позволил получить постгенерационный «атипичный» битуминит. Мацерал вносит значительный вклад в процессы генерации углеводородных соединений только в конце главной зоны нефтеобразования. Выявлено, что ОВ радиолярий после эксперимента все еще представлено исходным веществом. Также выявлено изменение флуоресцентных свойств генерируемого битума, что может указывать на образование новых легких соединений.

На основе полученных результатов выявлен порядок вступления мацералов в фазу генерации: раньше всех вступает альгинит, затем «обычный» битуминит, далее «атипичный» битуминит, последним ОВ радиолярий.

В дальнейшем планируется поставить ряд экспериментов, которые помогут бы проследить поэтапное преобразование «атипичного» битуминита, вывести формулу пересчета его показателя отражения на витринит, а также проследить, как и на какой градации катагенеза преобразуется ОВ радиолярий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баженова Т.К. Элементы региональной органической геохимии и раздельный прогноз нефте- и газоносности регионов // Георесурсы. 2021. Т. 23, № 2. С. 35–43.
- Баженова О.К., Бурлин Ю.К., Соколов Б.А., Хаин В.Е. Геология и геохимия нефти и газа. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. 384 с.
- Брадучан Ю.В., Гурари Ф.Г., Захаров В.А. и др. Баженовский горизонт Западной Сибири (стратиграфия, палеогеография, экосистема, нефтеносность) // Тр. Ин-та геологии и геофизики. № 649. Новосибирск: Наука, 1986. С. 27–31.
- Булатов Т.Д., Козлова Е.В., Пронина Н.В. и др. Кероген I типа в породах баженовской свиты Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2021. № 6. С. 111–118.
- Вассоевич Н.Б., Тимофеев П.П. Нефтематеринские свиты и признаки их диагностики. М.: Наука, 1979. 264 с.
- Гончаров И.В., Самойленко В.В., Обласов Н.В. и др. Молекулярные параметры катагенеза органического вещества пород баженовской свиты Томской области // Геология нефти и газа. 2004. № 5. С. 53–59.
- Гурари Ф.Г., Девятков В.П., Демин В.И. и др. Геологическое строение и нефтегазоносность нижней–средней юры Западно-Сибирской провинции. Новосибирск: Наука, 2005. 156 с.
- Калмыков Г.А., Балушкина Н.С. Модель нефтенасыщенности порового пространства пород баженовской свиты Западной Сибири и ее использование для оценки ресурсного потенциала. М: ГЕОС, 2017. 247 с.
- Калмыков А.Г., Карпов Ю.А., Топчий М.С. и др. Влияние катагенетической зрелости на формирование коллекторов с органической пористостью в баженовской свите и особенности их распространения // Георесурсы. 2019. Т. 21, № 2. С. 159–171.
- Кирюхина Т.А., Фадеева Н.П., Ступакова А.В. и др. Доманиковые отложения Тимано-Печорского и Волго-Уральского бассейнов // Геология нефти и газа. 2013. № 3. С. 76–87.
- Козлова Е.В., Фадеева Н.П., Калмыков Г.А. и др. Технология исследования геохимических параметров органического вещества керогеносыщенных отложений на примере баженовской свиты (Западная Сибирь) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2015. № 5. С. 44–53.
- Конторович А.Э., Нестеров И.И., Салманов Ф.К. и др. Геология нефти и газа Западной Сибири. М.: Недра, 1975. 680 с.
- Лопатин Н.П., Емец Т.П. Пиролиз в нефтяной геологии. М.: Наука, 1987. 143 с.
- Постников А.В., Гутман И.С., Постникова О.В. и др. Разномасштабные исследования геологической неоднородности баженовской свиты как основа для оценки ее углеводородного потенциала // Нефтяное хоз-во. 2017. № 3. С. 8–11.
- Пронина Н.В., Вайтхович А.П. Прямые признаки нефтеобразования в породах баженовской свиты // Георесурсы. 2021. Т. 23, № 2. С. 152–157.
- Санникова И.А., Ступакова А.В., Большакова М.А. и др. Региональное моделирование углеводородных систем баженовской свиты в Западно-Сибирском бассейне // Георесурсы. 2019. Т. 21, № 2. С. 203–212.
- Топчий М.С., Пронина Н.В., Калмыков А.Г. и др. Распределение органического вещества в породах баженовской высокоуглеродистой формации // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2019. № 2. С. 46–57.
- Филина С.И., Корж М.В., Зонн М.С. Палеогеография и нефтегазоносность баженовской свиты Западной Сибири. М.: Недра, 1984. 36 с.
- Штах Э., Маковски М.-Т., Тейхмюллер М. и др. Петрология углей. М.: Мир, 1978. 554 с.
- Эдер В.Г., Замирайлова А.Г., Занин Ю.Н. и др. Особенности формирования баженовской свиты при переходе от юры к мелу в центральной части Западной Сибири // Литосфера. 2015. № 3. С. 17–32.
- Curiale J.A., Curtis J.B. Organic geochemical applications to the exploration for source-rock reservoirs—A review // J. Unconventional Oil and Gas Resources. 2016. Vol. 13. P. 1–31.
- Espitalie J., Bordenave M.L. Rock-Eval pyrolysis // Appl. Petrol. Geochem. P.: Technip ed., 1993. P. 237–361.
- Hackley P.C., Cardott B.J. Application of organic petrography in North American shale petroleum systems: A review // Intern. J. Coal Geol. 2016. Vol. 163. P. 8–51.
- Hackley P.C., Valentine B.J., Hatcherian J.J. On the petrographic distinction of bituminite from solid bitumen in immature to early mature source rocks // Intern. J. Coal Geol. 2018. Vol. 196. P. 232–245.
- Kus J., Araujo C.V., Borrego A.G. et al. Identification of alginite and bituminite in rocks other than coal. 2006, 2009, and 2011 round robin exercises of the ICCP Identification of Dispersed Organic Matter Working Group // Intern. J. Coal Geol. 2017. Vol. 178. P. 26–38.
- Lui D.H., Shi J.C. Evaluation of early Paleozoic carbonate source rocks // Natural Gas Industry. 1994. Vol. 14, N 6. P. 32–36.
- Mastalerz M., Drobnik A., Stankiewicz A. B. Origin, properties, and implications of solid bitumen in source-rock reservoirs: a review // Intern. J. Coal Geol. 2018. Vol. 195. P. 14–36.
- Pickel W., Kus J., Flores D. et al. Classification of liptinite–ICCP System 1994 // Intern. J. Coal Geology. 2017. Vol. 169. P. 40–61.
- Stock A. T., Litke R., Schwarzbauer J. et al. Organic geochemistry and petrology of Posidonia Shale (Lower Toarcian, Western Europe) — The evolution from immature oil-prone to overmature dry gas-producing kerogen // Intern. J. Coal Geology. 2017. Vol. 176. P. 36–48.
- Wu L., Geng A., Wang P. Oil expulsion in marine shale and its influence on the evolution of nanopores during semi-closed pyrolysis // Intern. J. Coal Geol. 2018. Vol. 191. P. 125–134.

Поступила в редакцию 26.06.2021

Поступила после доработки 30.06.2021

Принята к публикации 13.12.2021